地震時斜面崩壊確率評価式に基づく道路ネットワーク途絶対策の試み

西田　佳佑[1]・三橋　遼大郎[2]・藤並　雄誠[3]・酒井　久和[4]・池田　勇司[5]

[1]学生会員　法政大学大学院博士前期課程　デザイン工学研究科　都市環境デザイン工学専攻
（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail:keisuke.nishida.6t@stu.hosei.ac.jp

[2]市川市役所　道路交通部（〒272-8501 千葉県市川市八幡 1-1-1）
E-mail: mryo5519@i.softbank.jp

[3]学生会員　法政大学大学院博士前期課程　デザイン工学研究科　都市環境デザイン工学専攻
（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail: yusei.fujinami.6f@stu.hosei.ac.jp

[4]正会員　博(工)　法政大学教授　デザイン工学部都市環境デザイン工学科
（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail:hisakai@hosei.ac.jp

[5]博(工)　法政大学　デザイン工学部都市環境デザイン工学科（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33）
E-mail:yuji.ikeda.66@adm.hosei.ac.jp

地震時の土砂災害により外部との物理的アクセスが断絶された孤立集落では，緊急車両による被災者への救援，救助活動は困難であり，二次被害が拡大する恐れがある．よって，地震の災害対策として，斜面崩壊による道路寸断を防ぎ，孤立集落の発生を抑制することは，被災者の安全を確保する上で非常に重要なことである．そこで本研究では，検討対象を和歌山県南部地域として，工学基盤の強震動波形データから地形ごとの地盤増幅率を用いて地表面最大加速度（PGA）を，標高データから勾配を算定し，地質図も含めた 3 種類のデータと斜面崩壊確率評価式を用いて斜面の崩壊確率を算出した．さらに，集落の孤立性評価の一例として，詳しく道路ネットワークの途絶確率を求め，求めた途絶確率をもとに，和歌山県南部集落の孤立性を評価した．

Key Words: *statistical analysis, the slope collapse probability evaluation, assessment of probability on iseolated settlements*

1. はじめに

斜面が多い地形であり，地震大国である我が国では，地震による土砂災害の被害が深刻である．斜面崩壊により，道路，鉄道が寸断されると孤立集落が発生する．そして，外部との物理的アクセスが断絶された孤立集落では，緊急車両による被災者への救援，救助活動は困難であり，二次被害が拡大する恐れがある．近年の被害地震，2011 年東北地方太平洋沖地震，2004 年新潟県中越地震，1995 年兵庫県南部地震においても甚大な土砂災害が発生している． 2004 年新潟県中越地震では，山間地での自然斜面崩壊等の多発により道路が多数の箇所で寸断されたため 61 に及ぶ孤立集落が発生し，孤立集落全体の救援，復旧活動に支障が生じた [1]．また，さらに，今後 30 年以内に震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率の高い地域として，首都直下地震，南海トラフ巨大地震，静岡県の駿河湾を震源とする地震があげられ，特に南海トラフ巨大地震は，今後 30 年間の発生確率が 60～70%と非常に高く，道路施設被害（路面損傷、沈下、法面崩壊、橋梁損傷等）は約 3 万～3 万 1 千箇所で発生すると想定されており [2]，孤立集落の発生を抑制するための対策は急務である．

各自治体では地震発生時に道路ネットワークを確保するために道路の補強工事等の対策を行っているが，限られた予算内で全ての道路において対策を行うのは不可能である．よって，対策費用が少額である道路を選定して補強することが効果的であると考えられる．崩壊確率が小さい斜面は，工事の規模が小さく，補強の費用も小さ

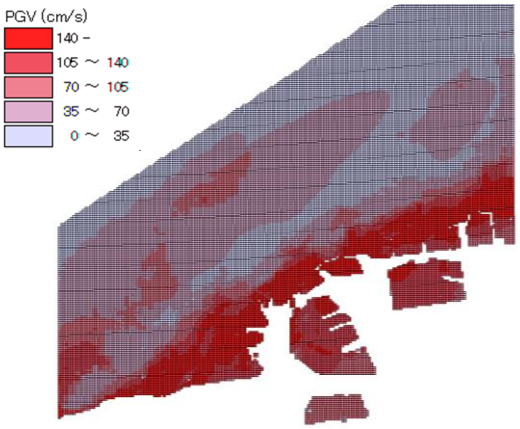

図 1　地表面最大速度(PGV)

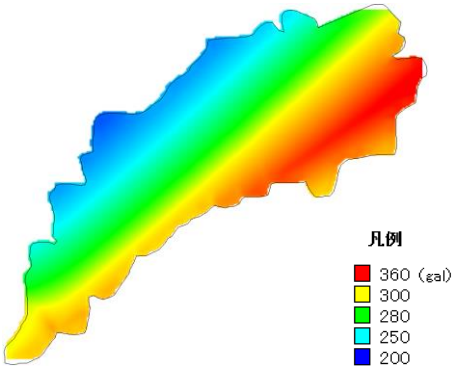

図 2　地表面最大加速度(PGA)

く済む．仮に斜面崩壊が発生したとしても被害は小さく，簡単な復旧工事によって早期に緊急車両が通行可能になるのではないかと想定される．

そこで，本研究では，地震により崩壊する危険がある斜面を事前に把握し，全対策費用が少額である道路を選定して，危険箇所に補強工事を行うことで孤立集落の発生を抑制することを目的とし，1995 年に発生した兵庫県南部地震における斜面崩壊確率評価を統計分析により行い，それにより算出された斜面崩壊確率評価式を用いて，南海トラフ巨大地震で大きな被害が予想されている和歌山県の道路ネットワークを対象とした孤立性の評価手法の有効性を検討する．

2.　斜面崩壊確率評価式

(1)　研究方法

1995 年兵庫県南部地震により被害が膨大であった兵庫県神戸市を本研究の対象地域とし，斜面崩壊確率評価手法を用いた被害規模の推定する．

統計分析に用いるデータの種類については，神戸市全域を対象に，勾配，地形データ，地質図および兵庫県南部地震における斜面の崩壊箇所データ，地震動データ(地表面最大速度・地表面最大加速度)を用いる．

最後に，評価式の妥当性検討を行う．データを基に

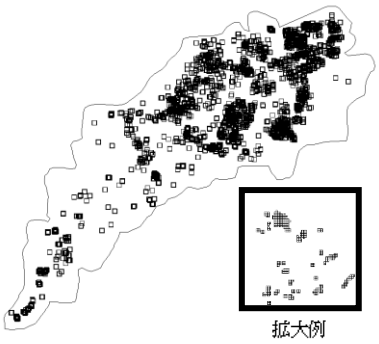

図 3　崩壊メッシュ

図 1　ロジスティック回帰分析ケース

	メッシュ間隔	勾配	地質	PGV	PGA
Case1	100m	○	○	○	―
Case2	10m	○	○	○	―
Case3	100m	○	○	―	○
Case4	10m	○	○	―	○

求められた評価式を用いて崩壊確率分布図を作成し，崩壊箇所データと比較することで評価式の妥当性を検討する．

(2)　ロジスティック回帰分析

a)　分析データの概要

地表面最大速度(PGV)は，図 1 の藤並が松島・川瀬 [4] の地震動を基に増幅率を乗じて算出し，得られたものを用いる．PGV についてはロジスティック回帰分析についても同様に崩壊確率に影響のある変数と考える．

地表面最大加速度(PGA)は，図 2 の国土交通省国土技術政策総合研究所の内田ら [5]により得られたものを用いる．

勾配は，J-SHIS の基盤地図情報ダウンロードサービスより対象地域の標高データを得た．標高データから平均最大法を用いて勾配を算出した．

地質図は，国立研究開発法人産業技術総合研究所より，20 万分の 1 シームレス地質図のものを用いた．このデータは，地質の年代や岩石名，岩相などをまとめ，386 の凡例に分類している．

斜面崩壊・非崩壊の判別方法は，斜面の崩壊箇所データから対象範囲全域を図 3 のように 10m×10mにメッシュ分割し，崩壊・非崩壊をプロットしたものを採用する．

b)　説明変数の検討

本研究では表 1 に示すとおり 4 つの Case に分け，ロジスティック回帰分析を行う．Case1，Case3 は 100m メッシュデータ，Case2，Case4 は 10m メッシュデータを使用する．

説明変数として Case1，Case2 に勾配，地質，藤並によ

表 2　地質別崩壊分布

分類	崩壊地点数	地点数	崩壊発生率	分類
風化しやすく硬岩	12788	895051	0.14287	3
風化しやすく軟岩	768	72463	0.010599	2
風化しにくく軟岩	569	238164	0.002389	1

表 3　各係数における相関(Case1)

	PGV	勾配	地質
PGV	1	-0.2755	-0.122
勾配	-0.2755	1	0.36334
地質	-0.122	0.36334	1

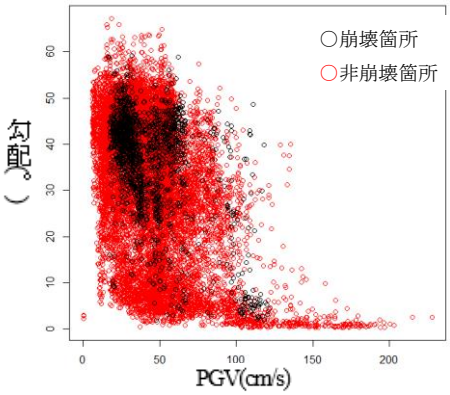

図 4　PGV と勾配の散布図(Case1)

表 4　各係数における相関(Case2)

	勾配	PGV	地質
勾配	1	-0.33	0.329
PGV	-0.33	1	-0.21
地質	0.329	-0.21	1

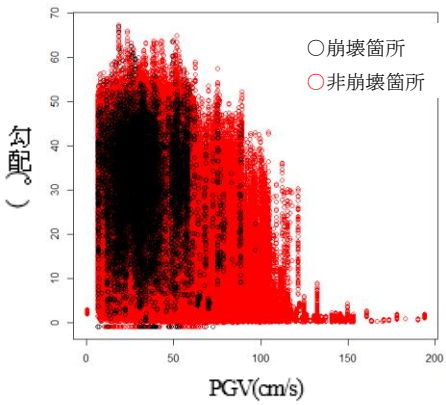

図 5　PGV と勾配の散布図(Case2)

表 5　各係数における相関(Case3)

	勾配	地質	PGA
勾配	1	0.37408	0.03811
地質	0.37408	1	-0.0293
PGA	0.03811	-0.0293	1

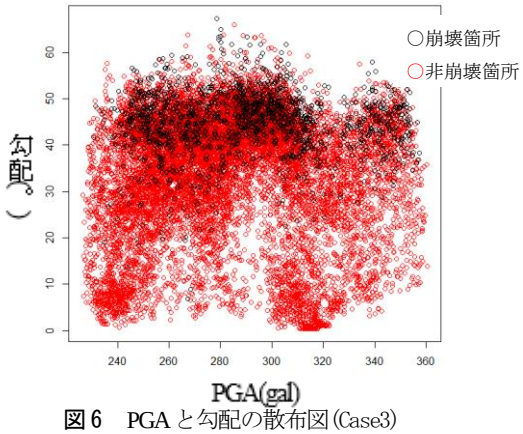

図 6　PGA と勾配の散布図(Case3)

表 6　各係数における相関(Case4)

	勾配	地質	PGA
勾配	1	0.33072	0.05261
地質	0.33072	1	0.00709
PGA	0.05261	0.00709	1

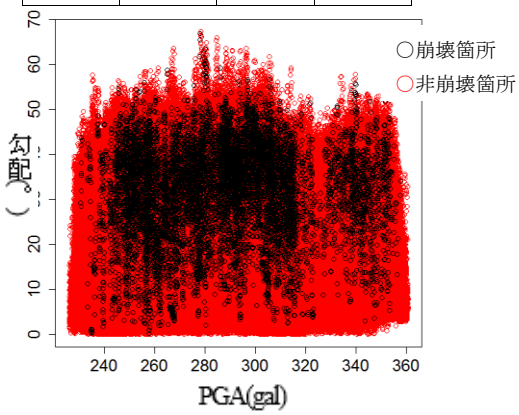

図 7　PGA と勾配の散布図(Case4)

り算出された PGV，Case3，Case4 に勾配，地質，内田らにより算出された PGA を用いる．ロジスティック回帰分析において，相関係数が強いデータを同時に入れると不安定な結果となることから，Case1~4 の妥当性を検討するために相関係数を求める．相関係数に関しては，スピアマンの順位相関係数，ケンドールの順位相関係数などがあるが，本研究では，偏差の正規分布を仮定することのできるピアソンの積率相関係数を用いる．また，地質を説明変数として用いる際には六甲山全体をメッシュ分割し，地質ごとに風化のしやすさ・軟岩と硬岩を調べ崩壊地点数の割合を算出する．そして表 2 に示すとおり崩壊発生率をもとに 3 つに分類し，その岩石に対する説明変数の値とする．

それぞれの説明変数の相関係数を算出後，を参考に説明変数ごとに相関の有無に基づいて，ロジスティック回帰分析に使用できるか検討する．

c)　検討結果

本項では，求められた説明変数の相関係数を表 3～6 に，散布図を図 4～7 に示す．散布図における黒丸は崩壊地域を表し，赤丸は非崩壊地域を示すものである．

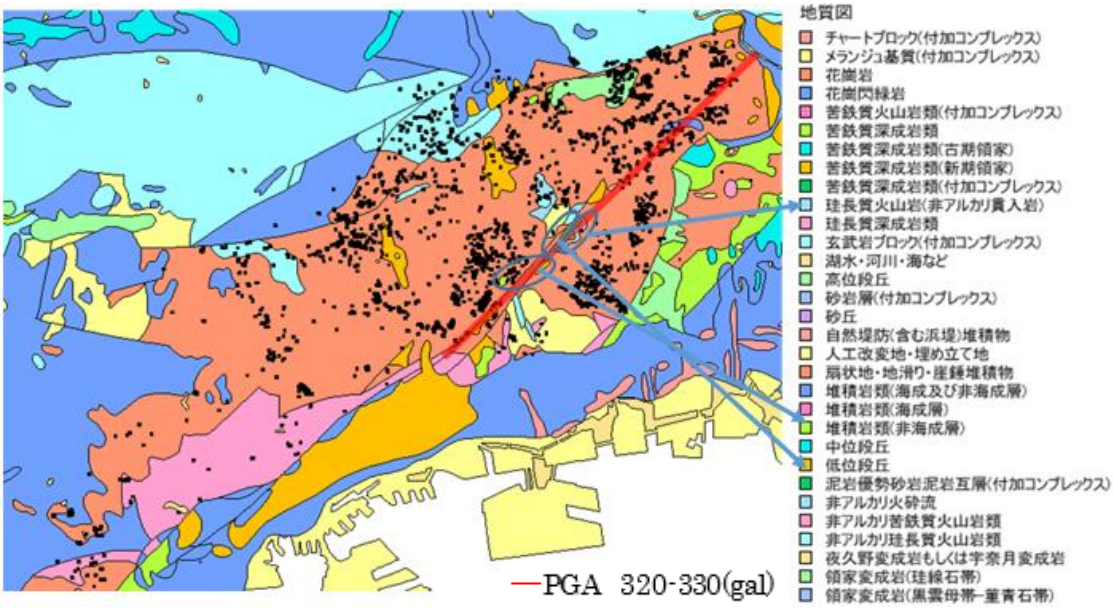

図 8　PGA320~330galの地域と崩壊地点

Case1 と Case2 の結果について比較する．2 つの Case では同じ項目を変数としている．2 つの Case の違いとして Case1 は 100m メッシュ，Case2 は 10m メッシュのデータである．勾配について Case1 は図 4 より勾配の大きい箇所において崩壊が多く見られる．しかし Case2 は図 5 り勾配が小さい地点での崩壊は見られないものの，図 4 ような勾配の大きい地点で崩壊するといった偏りは見られない．100m メッシュのデータは 10m メッシュで計算した勾配の中から最大値をとっているのに対し，10m メッシュではそのままの値を用いている．そのため 100m メッシュでは勾配が全体的に大きくなり，10m メッシュにおいては勾配の小さい値の割合が多くなることで勾配の値が分散したと考えられる．これは Case3 と Case4 についても同様のことが言える．また図 4，図 5 ともに PGV の値が低いところで崩壊が起きている．研究に用いた PGV は松島・川瀬の地震動を基に藤並が増幅率を乗じて算出されたものである．しかし松島・川瀬の地震動は市街地の観測記録を再現できるように震源断層モデルを作成しており，山地での強震動精度が不十分になった可能性が考えられる．そのため六甲山全山において崩壊地点の PGV が低くなっていると考えられる．

Case2 と Case3 の結果について比較する．Case2 は勾配，地質，PGV を変数として用い，Case3 では PGV の代わりに PGA を用いた結果である．Case2 では地震動の増大に伴い崩壊発生率が増加する傾向が見られなかったが，Case3 の結果では Case2 に比べ PGA の増大に伴い崩壊発生率が増加する傾向が得られている．PGA については藤並の手法でなく，2004 年に内田らにより算出されたものである．内田らによる PGA は距離減衰式を用いて算出され，地質ごとの地震動増幅効果ディレクティビティの影響を加味している．距離減衰式は，強震記録を回帰分析することで求められ，距離，マグニチュードなど簡単なパラメータにより地震動強さを予測する手法である．前述のように松島・川瀬は市街地の地震動再現に重点を置いているため，簡単であるが比較的精度の良い距離減衰式による PGA の方が増大に伴い崩壊発生率が増加する傾向が得られたと考えられる．これより PGA の方が崩壊発生率との正の相関関係があり，崩壊に与える地震動要因として妥当ではないかと考えられる．FEMA の水道管の耐震設計ガイドライン [6]においても PGA を斜面崩壊への危険性が高いパラメータであると示されている．

Case3 の図 6 を見ると勾配の値に関わらず PGA320～330 あたりで崩壊地点数が少ないとわかる．これは地質の影響が出たものと考えられる．図 8 でその地点を見てみるとその値の地震動地点のみ花崗岩だけの岩石類でなく風化しにくく軟岩である堆積岩(非海成)および低位段丘，珪長質火山岩が集中している．この岩石類は風化しやすく硬岩である花崗岩に比べ崩壊発生率が低い．このためこの値の PGA において崩壊地点が少なくなったと考えられる．ロジスティック回帰分析に用いることができる組み合わせの判断については，表 3～6 の説明変数間の相関係数の値は小さい．すなわち，各説明変数には相関が弱いまたは相関が見られない結果となった．

これより本研究において説明変数は全てロジスティック回帰分析に用いても問題ないと考えられる．

d)　分析結果

ロジスティック回帰分析を行う説明変数の組み合わせは，表 1 を参照する．解析により得られた定数，偏回帰係数及び P 値を表 7~10 に，解析により得られた結果を

表 7　ロジスティックモデルの偏回帰係数(Case1)

	偏回帰係数	P 値
定数	-6.059191	2.00E-16
勾配	0.093479	2.00E-16
PGV	-0.022487	2.00E-16
地質	72.658097	2.00E-16

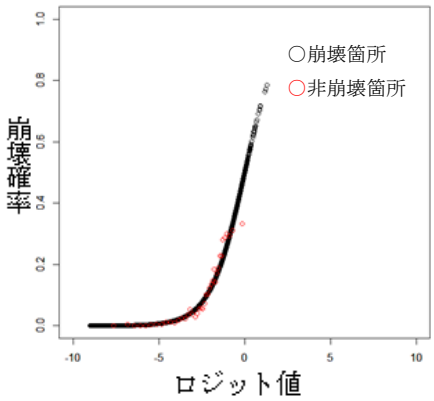

図 9　分析結果(Case1)

表 8　ロジスティックモデルの偏回帰係数(Case2)

	偏回帰係数	P 値
定数	-6. 671595	2.00E-16
勾配	0.0555597	2.00E-16
PGV	-0.017177	2.00E-16
地質	81.0474616	2.00E-16

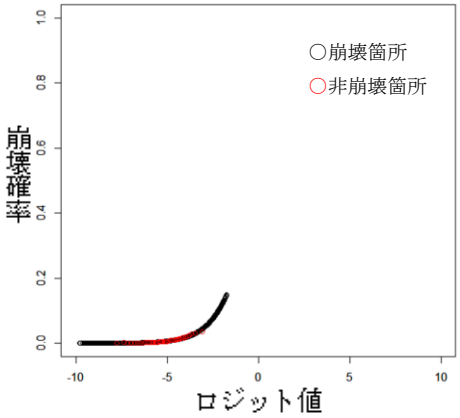

図 10　分析結果(Case2)

表 9　ロジスティックモデルの偏回帰係数(Case3)

	偏回帰係数	P 値
定数	-8.892371	2.00E-16
勾配	0.104569	2.00E-16
PGA	0.006833	9.34E-12
地質	0.233413	0.000178

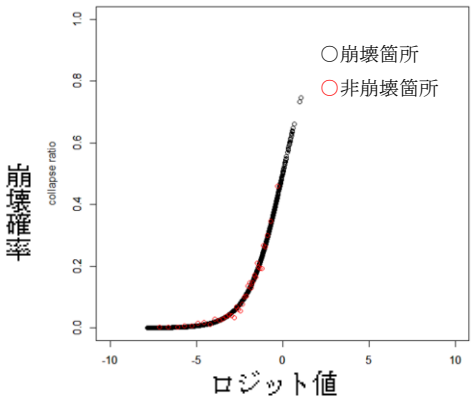

図 11　分析結果(Case3)

表 10　ロジスティックモデルの偏回帰係数(Case4)

	偏回帰係数	P 値
定数	-9.349	2.00E-16
勾配	0.063	2.00E-16
PGA	0.005373	2.00E-16
地質	100.10	2.00E-16

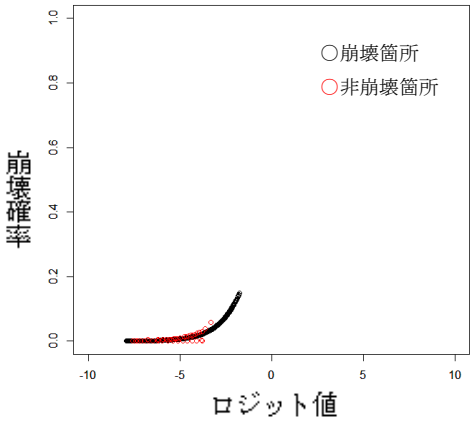

図 12　分析結果(Case4)

グラフ化したものを図 9~12 に示す．有意水準は 0.05 とする．

黒色でプロットした点はロジスティックモデルを表し，評価式により求められた崩壊確率をプロットしたものである．赤色でプロットした点は実崩壊確率を表している．実崩壊確率はロジット値の大きい方から 40 等分し，データの平均を計算してロジット値及び崩壊確率をプロットしたものである．

(3)　考察

X 軸に説明変数を含んでいるロジット値，Y 軸に崩壊確率を設定することで，説明変数ごとの崩壊確率を算出することができる．

全ての Case において P 値が 0.05 を上回らなかったことからも帰無仮説を棄却でき，統計的に有意であると判断された．また全ての Case において実際の崩壊確率とロジスティックモデルが近似していることから，精度の良い統計分析であるといえる．しかしながら，Case1,

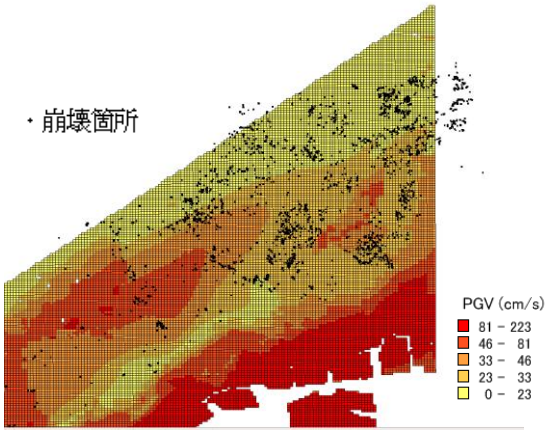

図 13　PGV と崩壊地点分布図

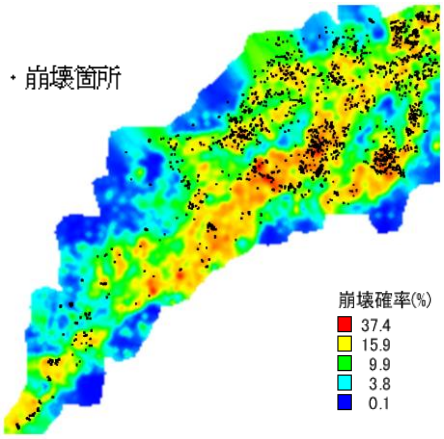

図 14　崩壊確率分布図と崩壊箇所(Case3)

Case2 では PGV の値が負値をとっていることから，PGV が大きくなるにつれて崩壊は発生しにくいということとなり，現実的に許容できる結果ではない．これは図 8 に示すとおり，崩壊地点が集中する地域の PGV の値が低いことが原因であると考えられる．研究に用いた図 13 の PGV は松島・川瀬の地震動を基に藤並が増幅率を乗じて算出されたものである．震災の帯が再現できていることからも市街地については精度がよかったといえる．しかし，先程述べたように，山地での強震動精度が不十分になった可能性が考えられるため，PGV が低くなり，ロジスティック回帰分析を行った結果，偏回帰係数が負値になったとわかる．このことから山地での強震動を再現できる震源断層モデルを作成し，PGV の算出を改めて行う必要があると考えられる．

ここで，Case1 と Case2 は同じデータの説明変数を用いた結果であるが，100m 間隔と 10m 間隔では崩壊確率の最大値が大きく違うことがわかる．これは 10m メッシュにしたことにより非崩壊メッシュ数が増えたことによるものである．

以上の結果と各要因の算定方法から，Case1，Case2，Case4 は妥当性でない結果とわかる．Case3 については Case1，Case2 で問題となっていた地震動の偏回帰係数がプラスの値をとっているが，この結果だけで妥当かどうかの判断は難しいため， Case3 における式の整合性を検討する．

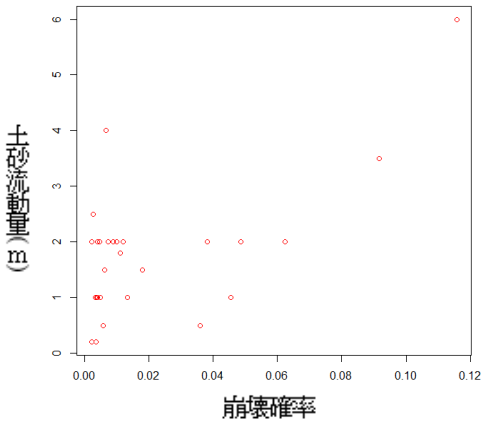

図 15　崩壊確率と流動量の散布図

求められた Case3 における斜面の崩壊確率評価式を用いて崩壊確率分布図を作成し，崩壊箇所データと重ね合わせたものを図 14 に示す．実崩壊箇所データとロジスティック回帰分析により求められた崩壊確率をコンター図と重ね合わせることで，本研究で算出した斜面の崩壊確率評価式の妥当性を検討する．崩壊箇所は暖色系の部分に集中しており，ロジスティック回帰分析による評価手法は整合性があるといえる．

(4)　流動量と崩壊確率の関係性の検討

a)　流動量と崩壊確率の関係性の検討方法

崩壊確率と土砂流動量の関係性を求めることで，崩壊確率より被害規模を推定することを考える．検討に用いる流動量については，神戸市の査定設計書より判断したものを用いる．

流動ありとする地点データについては査定設計書より被災地点における流動量を読みとる．崩土撤去の平面図及び現場写真により流動量を判断する．

流動なしとする地点データについては，非崩壊と判別したものを流動量 0 として採用する．崩壊非崩壊の判別は，崩壊のポリゴンデータから 10m×10mにメッシュ分割し，崩壊・非崩壊をプロットした査定設計書より判断したものを用いる．流動量のデータがある地点に対応する崩壊確率を求めるため，対応すると考えられる崩壊確率を抽出する．

データをまとめた後，流動量と崩壊確率の関係性を調べるため，相関係数及び散布図よりデータの傾向を求める．

b)　検討結果

流動量とその地点に対応する崩壊確率の相関係数の散布図を図 15 に示す． 査定設計書のデータについては今回収集したものでは約 40 点しかなかったが，相関係数の値は 0.62 となり，図 15 より散布図は右肩上がりの傾

向を有する．すなわち，中程度の相関関係があるという結果になった．データ数が少なくばらつきもあるためデータ数を増やし検討していく必要があると考える．

(5)　結論

本研究では兵庫県六甲全山を対象にロジスティック回帰分析により，斜面の崩壊確率評価式を検討し，土砂流動域との関係性を求めた．実崩壊箇所とロジスティック回帰分析により求められた確率分布図を比較することにより，ロジスティック回帰分析による評価手法は整合性があることが確かめられた．

また得られた崩壊確率評価式による崩壊確率と査定設計書による土砂流動量との相関を取ることで，両者に関係性があることが分かった．

六甲全山を対象に作成された斜面の崩壊確率評価式は式(1)のようになった．

$$y = \frac{1}{1 + \exp\{-(-8.892371 + 0.006833PGA + 0.104569\ 勾配 + 0.233413\ 地質図)\}} \quad (1)$$

ここに，

y：崩壊確率

PGA：地表面最大加速度(gal)

勾配：斜面勾配(°)

地質図：風化しやすく硬岩=3　風化しやすく軟岩=2

　　風化しにくく軟岩=1

また，流動量と崩壊確率の関係性の検討結果より崩壊確率と被害規模の関係は式(2)のようになる．

$$Y = 0.0149x - 0.0053 \quad (2)$$

ここに

Y：流動量(m)

X：崩壊確率

3.　地震対策斜面選定事例

(1)　孤立性評価手法の検討

南海トラフ巨大地震で大きな被害が予想されている和歌山県の道路ネットワークを対象とした孤立性の評価手法の有効性を検討する．

最初に，研究対象となる道路の選定を行う．和歌山県の道路について地図をもとに，集落間でネットワークを構成する道路を選定し，それを研究対象とする．

斜面崩壊確率の評価及び孤立性の評価に必要なデータは地震動データ（最大速度，最大加速度），勾配，地質図，道路防災点検データであり，特に地震動データについては，内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」において検討された南海トラフ巨大地震の工学的基盤における強震動波形データを基に，J-SHIS の表層地盤データより地形ごとの地盤増幅を考慮して，地表面での最大速度，最大加速度を算定する．勾配，地質図については，斜面崩壊確率評価式を求めたときと同様に求める．

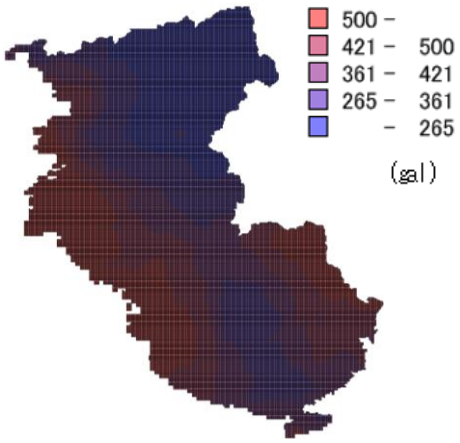

図 16　内挿後の工学基盤面の最大加速度

最後に，得られた斜面の崩壊確率評価式を使用し，和歌山県の道路の途絶確率を求め，それをもとに孤立性を評価する．

(2)　地震動データの作成

地震動データについては，内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」において検討された南海トラフ巨大地震の工学的基盤における強震動（加速度）波形データを基に地形ごとの地盤増幅を考慮して，地表面での最大速度，最大加速度を算定し，作成する．

南海トラフ巨大地震の工学的基盤における強震動波形データには，メッシュごとに南北（NS），東西（EW），上下（UD）の 3 成分の波形データがあり，時間間隔 0.02 秒で加速度値が書かれている．しかし，強震動波形データに入っているメッシュ数と実際のメッシュ数が一致せず，実際のメッシュ数が約 5000 に対し，強震動波形データに入っているメッシュ数は約 200 であった．よって，重み付き平均による内挿手法による強震動データの面内挿を行った．和歌山県全域の地表面最大加速度（PGA）分布を推定するにあたり，内閣府の工学基盤での強震動波形データはメッシュ間隔が約 1km（基準地域メッシュ)であるのに対して，J-SHIS の表層地盤の地盤増幅データのメッシュ間隔が約 250m（1/4 地域メッシュ）であるため，工学基盤面での最大加速度を 250m メッシュで内挿する．先ほど示した重み付き平均による内挿手法を用い，ウインドウの範囲（内挿する際，内挿する点の値を求めるために用いるデータの範囲）は周辺 12 点で内挿した．内挿後の工学基盤における最大加速度分布図を図 16 に示す．

地震動データの作成については，まず強震動（加速度）波形データがあるメッシュごと最大加速度を求める．

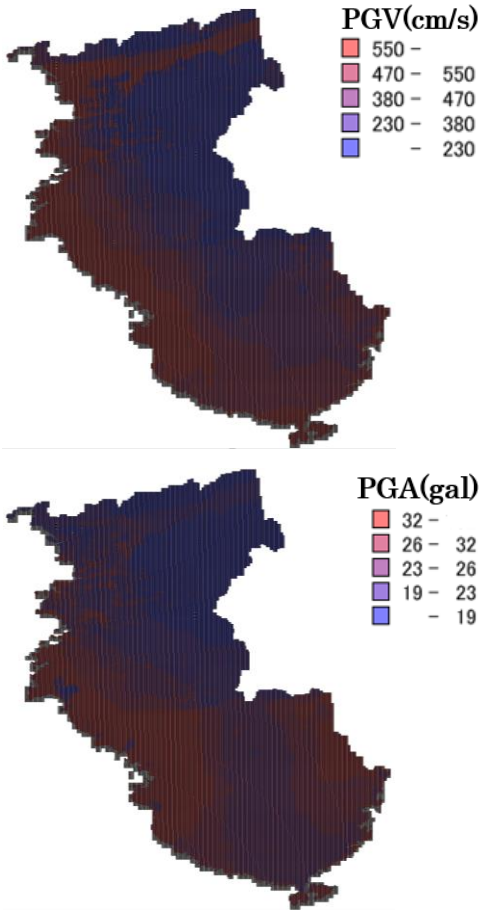

図 17　PGV と PGA の分布図

その後，加速度波形から速度波形を求め，最大速度を求める．次に，最大加速度，最大速度の面内挿を行い，データがないメッシュを内挿する．そして，求めた最大加速度，最大速度について，それぞれ NS，EW の 2 成分を合成し，さらに，J-SHIS より得た最大速度に対する地盤増幅率を用いて，地形ごとの地盤増幅を考慮した地表面での最大速度（PGV）を求める．

最後に PGV と表層 30m の平均 S 波速度を用いて藤本・翠川 [7]の関係式より最大加速度に対する地盤増幅率を算定し，それを用いて地形ごとの地盤増幅を考慮した地表面での最大加速度（PGA）を算出する．算出した PGV，PGA の分布図を図 17 に示す．

(3)　斜面崩壊確率評価

求められた斜面崩壊確率評価式を用いて斜面崩壊確率を評価する．前節で求めた地震動データ，さらに三橋と同様に求めた勾配と地質図を用いて斜面崩壊確率を算出した．和歌山県の道路防災点検データで対策工が必要と判断されている地点が多い県道 229 号を通る経路と，43 号と 44 号を通る経路の二つの経路がある新宮市熊野川町赤木から古座川町三尾川の道路ネットワークを含む和歌山県南部地域の崩壊確率を図 18 に示す．

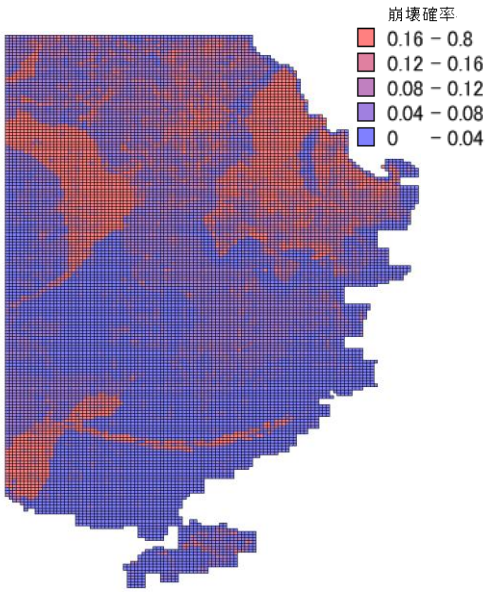

図 18　和歌山県南部地域の斜面崩壊確率分布図

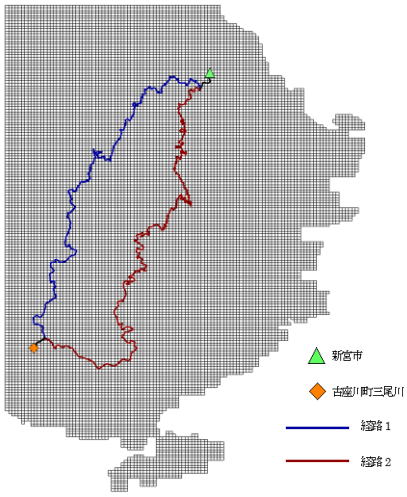

図 19　孤立性評価の対象となる道路ネットワーク

(4)　孤立性の評価

本節では，前節で崩壊確率を示した和歌山県南部の新宮市熊野川町赤木と古座川町三尾川を対象として，地域の孤立性の検討事例を示す．新宮市熊野川町赤木と古座川町三尾川は県道 229 号を通る経路と，県道 43 号と 44 号を通る経路の二つの経路がある．それぞれ，経路 1，経路 2 とし，図 19 に示す．

対象となる二つの経路はともに山に囲まれた山間部にあるため，道路の側方には膨大な数の斜面が存在する．ここで，下図の 250m メッシュデータ個々について，評価式に基づく斜面の崩壊確率をもとに経路の途絶確率を求めることも可能であるが，斜面の規模，斜面と道路の距離などから斜面崩壊が道路に影響を及ぼさない地点も含まれ，単純にデータ処理するとネットワークの途絶率を過大評価することが考えられる．一方，道路防災点検データは道路に影響を及ぼす斜面を現地調査をもとに

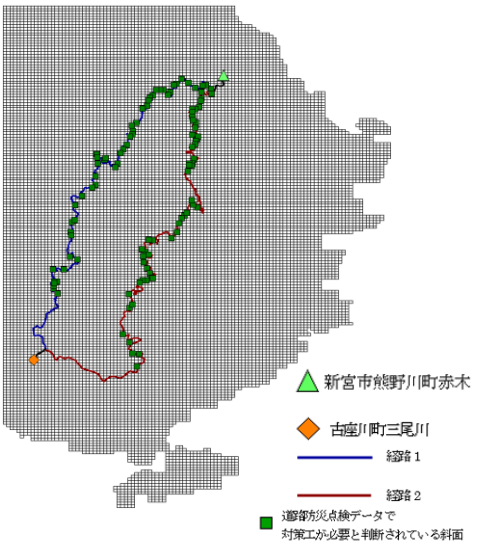

図 20　抽出された斜面の分布図

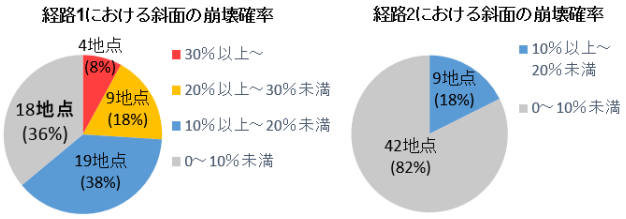

図 21　二つの経路における斜面の崩壊確率

抽出し，点検がなされたデータである．特に危険性が大きいと評価された斜面については対策工が必要であると記載されている．換言すれば道路防災点検データの対策工が必要となっていない地域は，斜面の湧水や風化などの観点も含めて，斜面災害が道路に大きな影響を及ぼさないと考えられる．そのため，本研究では道路防災点検データで対策工が必要であると判断されている斜面のメッシュのみ抽出し，その斜面における崩壊確率によって途絶確率を求めることにより，孤立性を評価する．なお対策工が必要とされている斜面は，経路 1 には 50 地点，経路 2 には 51 地点存在した．抽出された斜面の分布図を図 20 に示す．

(5)　孤立性評価の結果と考察

それぞれの斜面の崩壊確率と以下の式（1）を用いて途絶確率を求めた結果を図 21 と表 11 に示す．途絶確率は，経路 1 が 99.98%，経路 2 が 93.70%となり，仮に 2 経路のみがアクセス可能な経路とすると，どちらも非常に高い値になってしまった．経路 1 においては崩壊確率の一番高い斜面は 34.97%と非常に高く，経路 1 の 50 地点のうち，10%を超える斜面が 32 地点，30%を超える斜面が 4 地点存在した．しかし，経路 2 においては崩壊確率の一番高い斜面は 18.92%と経路 1 と比べて低い値を示し，経路 2 の 51 地点のうち，10%を超える斜面も 9 地点と経路 1 と比べて少ない．

表 11　孤立性評価の結果

	途絶確率（%）	10地点の斜面に対して対策工を施した場合の途絶確率（%）	対策後崩壊確率10%を超える斜面の地点数	対策前斜面崩壊数の期待値	対策後斜面崩壊数の期待値
経路1	99.98	99.19	22	7.4	4.4
経路2	93.70	79.30	0	2.7	1.6

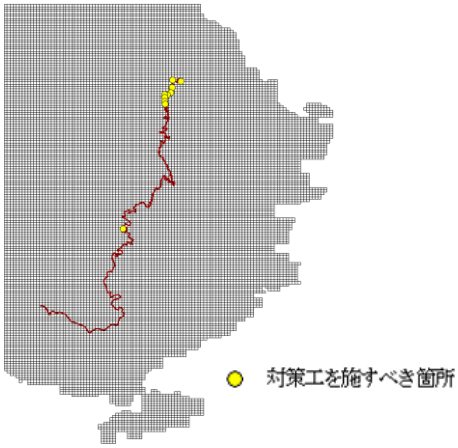

図 22　対策工を施すべき箇所の提案図

ここで，仮に 10 地点の斜面に対して対策工を施すだけの費用があるとする（対策工を施した斜面は地震が起きても崩壊しないものとする）．斜面の崩壊確率が高い順に対策工を施すとして，経路 1，経路 2 のどちらの経路の斜面に対策工を施すべきかを考える．経路 1 に対策工を施したとしても，経路 1 の途絶確率は 99.19%と依然非常に高い値を示している上，崩壊確率が 20%を超える斜面のいくつかにも対策工を施せずそのままになってしまう．しかし，経路 2 に対策工を施したとすると，経路 2 の途絶確率は 79.30%と施工前に比べると 10%以上低くなり，集落が孤立する可能性を少しだが抑えることができる．また，崩壊確率が 10%を超える全ての斜面に対して対策工が施せる．流動量と崩壊確率の関係性の検討では崩壊確率と土砂流動域には中程度の相関が示されており，崩壊確率が高くなる斜面ほど崩壊の規模が大きくなると結論付けている．よって，崩壊確率が高い斜面に対して対策工を施した経路 2 では，仮に斜面崩壊が発生しても規模は小さく済むと考えられ，小規模の崩壊は 1 日程度で緊急車両の通行が可能になる [8]ので，斜面崩壊数の期待値が 1.6 である経路 2 は 1～2 日で緊急車両の通行が可能になると考えられる．

したがって，経路 2 の崩壊確率が高い斜面に対して対策工を施すことで，途絶確率が少し下がり，集落が孤立する可能性を少しだが抑えることができる上，仮に斜面崩壊が発生したとしても被害は小さく，簡単な復旧工事によって 1～2 日で緊急車両の通行が可能になるのではないかと考える．経路 2 の対策工を施すべき箇所（10 地点）の提案図を図 22 に示す．

4.　まとめ

本研究では，和歌山県南部地域を対象に集落の地震時の孤立性評価法を検討し，以下の成果を得た．

①様々な項目の組み合わせパターンに対してロジスティック回帰分析を行い，斜面崩壊確率評価式を作成した．

②内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」において検討された南海トラフ巨大地震の工学的基盤における強震動（加速度）波形データを用いて，地震動データ（PGV，PGA）を算出した．

④求めた PGA，勾配，地質図より斜面崩壊確率評価式を用いて斜面の崩壊確率を算出し，道路ネットワークの途絶確率を求めた．

③一例として，新宮市熊野川町赤木と古座川町三尾川を結ぶ二つの経路に対して事例分析を行った．二つの途絶確率と各斜面の崩壊確率より，仮に 10 地点の斜面に対して対策工を施すだけの費用があるとしたときに，どちらの経路の斜面に対策工を施すべきかを考察した．

⑤その結果，経路 2 の崩壊確率が高い斜面に対して対策工を施すことで，途絶確率が少し下がり，集落が孤立する可能性を少しだが抑えることができる上，仮に斜面崩壊が発生したとしても被害は小さく，簡単な復旧工事によって 1～2 日で緊急車両の通行が可能になるのではないかと考えられることを示し，また評価結果をもとに対象の道路ネットワークについて対策箇所の提案を示した．

謝辞：和歌山県県土整備部道路局道路保全課の青石様には，和歌山県の道路防災点検データの提供を受けました．内閣府の南海トラフの巨大地震モデル検討会様には南海トラフ巨大地震の工学的基盤における強震動波形データの提供を頂きました．査定設計書の複写にあたっては，神戸市建設局道路部工務課の高橋和也様と前田係長様にご協力頂きました．六甲山崩壊箇所のデータに当たっては近畿地方整備局六甲砂防事務所の星野課長様，鹿児島大学の地頭薗教授先生より提供していただきました．記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 内閣府：孤立集落対策について，2007.
2) 内閣府：南海トラフ巨大地震の被害想定（第二次報告）ついて，2013.
3) 塩飽　拓司：地震時による土砂災害リスク評価，法政大学卒業論文，2011.
4) 1995 年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価，日本建築学会構造工学論文集，Vol.55B，pp.537-543, 2009.
5) 内田太郎，片岡正次郎，岩尾忠明，松尾修，寺田秀樹，中野泰雄，杉浦信男，小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究，p61，2004.
6) John Eidinger (Chairman)，Bruce Maison，Luke Cheng，Frank Collins，Mike Conner，Craig Davis，Mike Matson，Mike O'Rourke，Tom O'Rourke，Alex Tang，John Wesling：Seismic Guidelines forWater Pipelines，pp23-30，2005.
7) 藤本一雄・翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均Ｓ波速度の関係，日本地震工学会論文集，第 6 巻，第 1 号，pp.18-19，2006.
8) 国土交通省道路局：東北地方太平洋沖地震 道路復旧状況等について，2013.

TRIAL OF ROAD NETWORK STOPPAGE MEASURES BASED ON THE EARTHQUAKE SLOPE COLLAPSE PROBABILITY EVALUATION EXPRESSION

Keisuke NISHIDA, Ryotaro MITSUHASHI, Yusei FUJINAMI, Hisakazu SAKAI, Yuji IKEDA

The relief to the victim with the emergency vehicle, the rescue operation are difficult, and, at the isolated village where physical access with the outside was broken off by the earth and sand disaster at the time of the earthquake, second damage might enlarge it. Thus, as anti-disaster measures of the earthquakes, I prevent road cutoff by the slope collapse, and it is the thing that is very important in ensuring the security of the victim to control the outbreak of the isolated village. Therefore, in this study, I calculated an incline from altitude data by acceleration (PGA) earth surface's greatest in an examination object as South Wakayama area from the strong vibration wave pattern data of the engineering base using a ground amplification rate every topography and calculated the collapse probability of the slope using data and the slope collapse probability evaluation type of three kinds that the geologic map included. Furthermore, as an example of the isolated evaluation of the village, I found the stoppage probability of the road network in detail and evaluated the exclusivity of the South Wakayama village based on the stoppage probability that demanded it.